

“PULL-OUT” DE FIBRAS DE POLIOLEFINA: INFLUENCIA DE LA INCLINACIÓN Y LA LONGITUD EMBEBIDA EN LA RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO

M. G. Alberti^{1,*}, A. Enfedaque¹, J. C. Gálvez¹, A. Ferreras¹

¹Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. c/ Profesor Aranguren, s/n, 28040, Madrid, España.

E-mail*: mgalberti@caminos.upm.es

RESUMEN

En investigaciones previas sobre el comportamiento en fractura de hormigones reforzados con fibras de poliolefina, se comprobó la aptitud estructural del material. Estas fibras, químicamente estables y cuya adherencia se mejora con un tratamiento superficial, cumplen los requisitos exigidos con dosificaciones en peso muy inferiores a las fibras de acero. Sin embargo, no existen estudios sobre la respuesta de dichas fibras frente al arrancamiento de la matriz de hormigón. En este estudio se ha diseñado un ensayo de pull-out de fibras sincronizando la máquina de ensayos con un sistema de video-extensometría. Se han realizado ensayos de arrancamiento de fibras de poliolefina variando la longitud embebida y el ángulo de inclinación de las fibras, entre 0° y 60°, en probetas fabricadas con el hormigón autocompactante. El ensayo permitió obtener resultados de fuerza máxima y energía de arrancamiento.

ABSTRACT

Previous research showed that polyolefin fibres enable their use in structural applications of the composite material. Such fibres are chemically stable and their adhesion is enhanced by surface treatments. The properties of the polyolefin fibre reinforced concrete can meet the requirements of the standards with lower weights than steel fibres. However, there is a lack of research about their pull-out behaviour. In this study a pull-out test was designed synchronizing the testing machine with video-extensometer devices. The tests were performed on self-compacting concrete specimens with two embedded length and varying their inclination from 0° to 60°. The results provided interesting information about the pull-out load and the energy absorbed in the process.

PALABRAS CLAVE: Hormigón reforzado con fibras, Fibras de poliolefina, Hormigón autocompactante, Pull-out, Arrancamiento.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, uno de los mayores logros del hormigón reforzado con fibras (HRF) ha sido la posibilidad de reemplazar el refuerzo con barras de acero corrugado tradicional en el hormigón armado por fibras [1]. Las más utilizadas han sido las fibras de acero conformadas con los extremos en patillas lo que se puede comprobar por la cantidad de publicaciones académicas y aplicaciones prácticas [2]. Su anclaje mecánico en los extremos, la energía necesaria para rectificar la patilla junto con las magníficas propiedades en tracción del acero, han demostrado ser muy efectivas [3]. El desarrollo de nuevas fibras macro-sintéticas ha permitido alcanzar resistencias residuales aptas para el uso estructural de estas fibras como refuerzo del hormigón. Además de reducciones en el coste final del material, estas fibras son químicamente estables. Los primeros desarrollos de fibras de poliolefina concluyeron que las propiedades de la inter-cara eran especialmente adecuadas para su uso en hormigón [4, 5]. No obstante, dichas investigaciones se realizaron con fibras de inferiores propiedades mecánicas y con superficies lisas y formas cilíndricas. Las fibras de poliolefina actuales poseen propiedades mecánicas

mejoradas y un tratamiento superficial que mejora la eficiencia del sistema fibra-matriz. Existen investigaciones que han permitido la sustitución total del acero en piezas de hormigón con fibras de poliolefina. Las conclusiones obtenidas con fibras de acero no son directamente aplicables a las fibras de poliolefina [6]. A pesar de ello, el hormigón reforzado con fibras de poliolefina ha demostrado superar los requisitos fijados en la normativa actual [7] que permite tener en cuenta la contribución de las fibras en el cálculo estructural, aportando importantes resistencias residuales en ensayos de fractura [8, 9, 10].

Durante los procesos de fisuración del hormigón reforzado con fibras, la fisura permanece cosida por fibras aleatoriamente distribuidas que impiden la propagación de ésta, si están suficientemente ancladas. Con ello, se puede prevenir el desarrollo de la fisura, alcanzándose en algunos casos, importantes deformaciones y resistencias residuales sin que la pieza de hormigón colapse. Este efecto, conocido como *punteo* de la fisura, depende de la eficiencia del sistema fibra-matriz. Para mejorar el resultado se puede actuar sobre las propiedades de la fibra o la matriz o bien mejorando las interacciones físicas o químicas

entre fibra y matriz [11]. Además, se pueden dar formas a las fibras que produzcan anclajes mecánicos en zonas localizadas. Todas estas posibilidades tratan de incrementar la energía necesaria para extraer una fibra de la matriz. La eficiencia del sistema depende también del ángulo de inclinación de la fibra y de la longitud embebida. En el caso óptimo, la fuerza de arrancamiento sería igual a la resistencia a tracción de la fibra y estaría en equilibrio con las fuerzas que se oponen a la extracción de la fibra [12]. En definitiva, la posibilidad de mejorar la resistencia al arrancamiento está directamente relacionada con mejorar la respuesta post-fisuración del hormigón reforzado con fibras. Por ello, el comportamiento de las fibras frente al arrancamiento ha sido el centro de numerosas investigaciones abarcando una amplia variedad de formas y materiales constituyentes de las fibras [13]. De los ensayos de arrancamiento, conocidos con el anglicismo “pull-out”, se obtiene información muy relevante que puede ser utilizada para el desarrollo de modelos numéricos del comportamiento en tracción del HRF [14] o para la elección o investigación en la mejora de varias tipologías de fibra [15].

El anclaje de las fibras de acero con patillas en los extremos es marcadamente distinto al de las fibras macro-poliméricas con superficies rugosas. Esto último, unido a las diferencias en cuanto a sus propiedades mecánicas ha mostrado que el mejor aprovechamiento de cada una de las fibras se alcanza para estados de deformación distintos. Estos resultados han permitido aprovechar las ventajas de ambas tipologías combinando fibras cortas de acero con extremos en patillas y fibras largas de poliolefina dando resultados sinérgicos en fractura [16]. En todo caso, existe un déficit de investigaciones respecto a los mecanismos de resistencia al arrancamiento de fibras estructurales de poliolefina.

Para el presente estudio se realizaron ensayos “pull-out” de fibras de poliolefina diseñándose ensayos con un sistema de video-extensometría y análisis de imagen. Las probetas de ensayo se fabricaron embebiendo las fibras con cinco ángulos de incidencia y dos longitudes embebidas en un hormigón autocompactante similar al estudiado en las referencias [8, 9, 10, 16]. Mediante el sistema de análisis digital de imagen, se pudieron observar las deformaciones elásticas iniciales y obtener las curvas de arrancamiento una vez la fibra comenzó a desplazarse. Las curvas representativas de comportamiento fueron finalmente obtenidas interpolando los valores de desplazamiento relativo entre varios puntos especialmente elegidos y los valores de fuerza proporcionados por la célula de carga. La interpolación fue posible gracias a la sincronización del tiempo de ensayo en la máquina y en la grabación del video. Las conclusiones obtenidas mostraron que el comportamiento frente al arrancamiento de las fibras de poliolefina con tratamiento superficial es comparable al de las fibras de acero conformadas en patillas.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Para la realización de los ensayos “pull-out” se fabricaron probetas cilíndricas con hormigón autocompactante de diámetro 90mm y 60mm de altura. Los detalles de la fabricación del hormigón autocompactante pueden verse con mayor detalle en las referencias [8, 9, 10, 16] ya que se utilizó el mismo diseño de la mezcla y los mismos materiales. Dicha dosificación, junto con los resultados obtenidos en el ensayo de escurrimiento siguiendo la norma EN-12350-8 pueden verse en la Tabla 1. En la tabla se muestra también el valor obtenido de resistencia característica del hormigón a 28 días ($f_{ck,28}$) de acuerdo con la norma EN 12390-3, habiéndose fabricado también tres probetas cilíndricas de 300mm de altura y 150 de diámetro. Estas probetas se mantuvieron las primeras 24 horas en los moldes a temperatura de laboratorio y se introdujeron posteriormente en una cámara de curado a 20°C y humedad relativa del 95% hasta la edad de ensayo. Estos ensayos se realizaron para asegurar la calidad del hormigón fabricado, siendo los valores similares a los obtenidos en los citados trabajos previos. Las propiedades de las fibras se pueden ver en la Tabla 2 y el aspecto visual de las mismas en la Figura 1.

Tabla 1. Dosificación del hormigón autocompactante y resultados de escurrimiento y compresión simple.

Cemento (kg/m³)	375	
Agua (kg/m³)	188	
Filler calizo (kg/m³)	200	
Arena (kg/m³)	918	
Gravilla (kg/m³)	245	
Grava (kg/m³)	367	
Relación a/c	0,50	
Superplastificante: % en peso de cemento	en kg/m³	4,7
		1,25
Ensayo de escurrimiento	T_{500} (s)	3,25
	d_f (mm)	695
$f_{ck,28}$ (MPa)		39

Tabla 2. Propiedades de las fibras de poliolefina.

Densidad (g/cm ³)	0,91
Longitud (mm)	60
Diámetro equivalente (Ø) (mm)	0,92
R. a tracción (MPa)	> 500
Módulo de elasticidad (GPa)	> 9
Fibras/kg	27.000

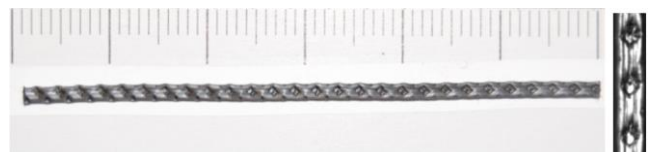


Figura 1. Aspecto visual de las fibras de poliolefina.

2.1. Descripción de los ensayos

Las fibras fueron colocadas en tapas de poli-estireno expandido de 50mm de espesor. Para asegurar la correcta disposición de las fibras, éstas se insertaron en las tapas dejando únicamente saliente la longitud embebida buscada con la inclinación deseada. Una vez el molde cilíndrico se relleno de hormigón, las tapas se colocaron encima de los mismos. Este procedimiento, así como la geometría de las tapas y los moldes puede verse en la Figura 2. Tras la realización de los ensayos se realizaron mediciones con hilo de cobre del hueco dejado por la fibra arrancada, que corroboraron que las dimensiones reales coincidían con las deseadas. Antes del ensayo las probetas cilíndricas se pintaron de negro para el uso de la video-extensometría y se le colocó una capa de teflón en la zona de contacto de la probeta con la jaula del ensayo. En la Figura 3 puede verse el aspecto final de una probeta con 10mm de longitud embebida y con una inclinación de 15°. Para analizar la influencia de la longitud embebida, se utilizaron longitudes de 10 y 20mm. El ángulo de inclinación de la fibra se varió fabricándose probetas con 0°, 15°, 30°, 45° y 60°. Se confeccionaron tres probetas de cada configuración geométrica, resultando un total de 30 probetas.



Figura 2. Fabricación de las probetas cilíndricas con HAC.



Figura 3. Probeta de hormigón autocompactante preparada para el ensayo de arrancamiento con 10mm de longitud embebida e inclinación 15°.

Los ensayos se diseñaron junto con la optimización de los sistemas de video-extensometría. La base de esta técnica en dos dimensiones consiste en la grabación de imágenes con un número constante de imágenes por segundo que, sincronizado los resultados de la máquina

de ensayos, permite la integración de ambos equipos. El análisis de las imágenes digitales se llevó a cabo mediante el software *ImageJ* que permite detectar la posición del centro de gravedad de puntos blancos sobre fondo negro en cada fotograma. Se pintaron varios puntos blancos en las fibras y de referencia en la pieza de hormigón. El color del resto del encuadre permaneció cercano al negro. Esto puede observarse en las figuras 4 y 5. El equipo de grabación se compuso de una cámara de alta definición IDS UI-1480SE que proporciona una resolución de 2560x1920 píxeles con un sensor de cinco megapíxeles. Este sensor es especialmente adecuado para este tipo de ensayo por su alta sensibilidad y reducción de ruido en la imagen.

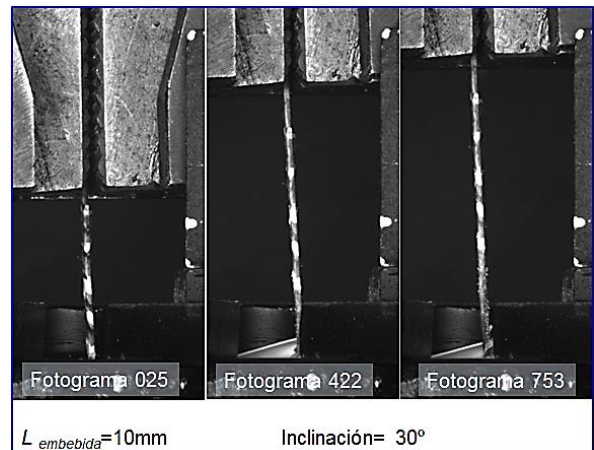


Figura 4. Aspecto de las fibras en tres estados de deformación.

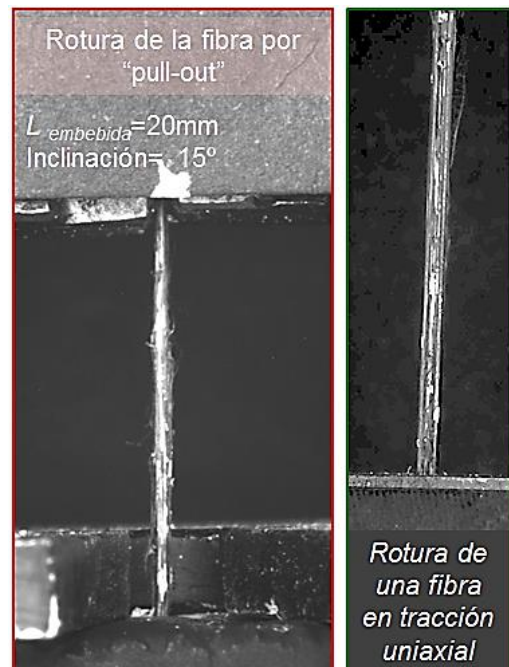


Figura 5. Aspecto de una fibra tras producirse el fallo de la misma.

Los ensayos se realizaron en control de posición del actuador a una velocidad de desplazamiento de 0,02 mm/s. El vídeo se grabó a una velocidad de un

fotograma por segundo, lo que facilitó su análisis y limitó el número de imágenes a tratar. Una vez el ensayo concluyó, se integraron e interpolaron los datos de fuerza, posición y tiempo obtenidos de la máquina de ensayos con los de la grabación. Con los fotogramas se pudo obtener la deformación entre dos puntos superiores de la fibra y el desplazamiento de un punto situado en la salida de la fibra. Si se observa la Figura 6, puede verse un esquema del montaje de la probeta y la situación de los puntos de medición. Además, en la Figura 4 se mostraron previamente tres fotogramas de un ensayo, apreciándose el proceso previamente descrito.

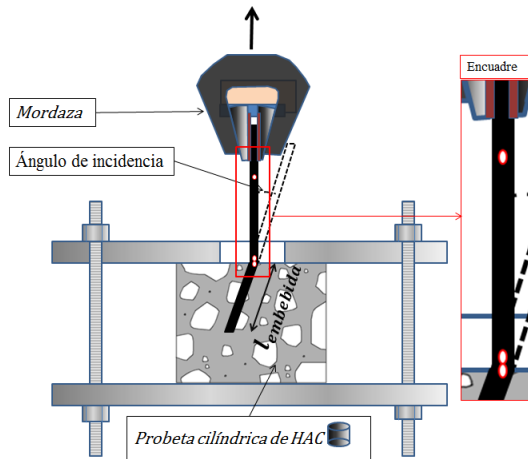


Figura 6. Configuración del ensayo de "pull-out".

En dicha figura también se puede ver el marco metálico que se diseñó para el montaje, consistente en dos platos de aluminio de 10mm de espesor que se fijaron en ambas bases de la probeta cilíndrica por medio de pernos de acero. Al plato superior se le realizó un rebaje para que la cámara pudiese grabar los detalles de la salida de la fibra. Esto permitió captar cualquier movimiento relativo no deseado. También permitió asegurar que no había movimientos relativos entre la fibra y la mordaza, quedando también registrados en la grabación. La longitud de fibra entrante necesaria en la mordaza fue medida durante la puesta a punto de los ensayos caracterizando fibras sueltas y con puntos blancos a la salida de las mordazas. En dichos ensayos se obtuvo una tensión media de rotura de 376 MPa, lo que supone una carga máxima de aproximadamente 250N. La forma de rotura de las fibras en un ensayo de "pull-out" y en un ensayo a tracción simple, se mostró anteriormente en la Figura 5.

3. RESULTADOS

Los resultados de los ensayos de arrancamiento de las fibras de poliolefina con una longitud embebida de 10mm pueden verse en la Figura 7. Se han representado las curvas representativas con cada inclinación. Las fuerzas máximas obtenidas se incrementaron con la inclinación de las fibras hasta 45°. Sin embargo, cuando el ángulo de incidencia de la fibra en la probeta llegó a

los 60°, el fallo se produjo en la cuña de la matriz de hormigón.

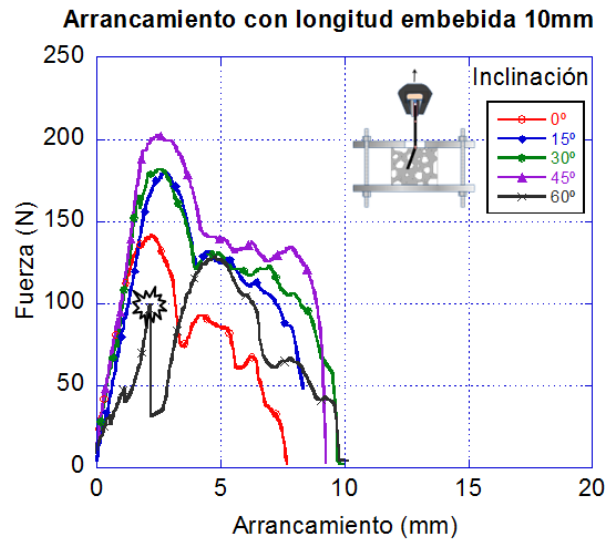


Figura 7. Curvas de arrancamiento de las fibras de poliolefina con longitud embebida 10mm.

Si se observa la Figura 8 se puede ver la curva representativa de los ensayos de arrancamiento con fibras de poliolefina embebidas 20mm e inclinación 0°. La curva alcanza valores de fuerza superiores a los obtenidos con 45° y longitud embebida 10mm representados en la Figura 7. Este ángulo supone la entrada de la fibra perpendicular al plano de la base de la probeta. Es importante destacar, como se puede apreciar en la Figura 8, que con un ángulo de inclinación de 15° se produjo el fallo por rotura de la fibra. Esto se repitió para cualquier ángulo superior, pudiéndose concluir que la longitud crítica se puede considerar ligeramente superior a 20mm.

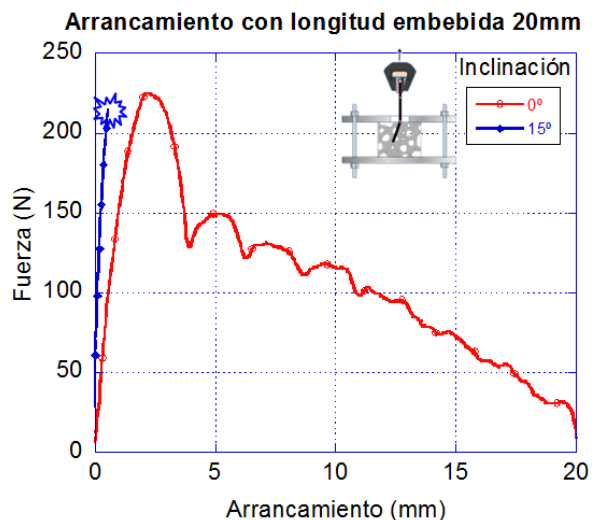


Figura 8. Curvas de arrancamiento de las fibras de poliolefina con longitud embebida 20mm.

Para realizar un análisis en mayor detalle, los resultados medios de fuerza máxima se presentan en la Tabla 3. Los valores de $\tau_{despegue}$ se obtuvieron según las expresión (1), siendo $F_{despegue}$ la fuerza alcanzada en el

ensayo cuando la fibra comenzó a deslizar y siendo τ_{max} la que se correspondería con F_{max} . Esto se pudo realizar gracias a la video-extensometría.

Tabla 3. Resultados medios de los ensayos de arrancamiento de las fibras.

Longitud embebida	Inclinación	F_{max}		τ_{max}	$\tau_{despegue}$
		(N)	% σ_u	(MPa)	(MPa)
10	0	146	58%	5,05	4,60
10	15	179	72%	6,21	5,32
10	30	181	73%	6,27	4,51
10	45	202	81%	6,99	6,31
10	60	128	51%	4,43	-
20	0	224	90%	3,88	3,59
20	15	225	90%	3,89	-

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot l \cdot \phi} \quad (1)$$

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la Figura 9 se han comparado las curvas de arrancamiento con inclinación 0° y ambas longitudes embebidas. Observando la figura, se puede apreciar cómo se incrementa la rigidez y la carga máxima con la longitud embebida. También es fácil observar que si consideramos el trabajo de extracción de la fibra, la energía absorbida y los desplazamientos son mayores con 20mm de longitud embebida. Siendo ambas conclusiones esperables, cabe comparar estos resultados con los obtenidos por otros autores en ensayos similares con fibras de acero conformadas en patillas. Para ello, se compararon las fuerzas máximas obtenidas de los ensayos del presente estudio con los obtenidos en la referencia [12] y se presentan en la Figura 10. En cuanto al trabajo de arrancamiento, se ha incluido en la Figura 11 un gráfico de barras con los datos de trabajo de arrancamiento hasta la carga pico y el trabajo total para todas las probetas en las que se pudo arrancar la fibra. También se han incluido en dicha figura los resultados con fibras de acero conformadas en patillas, publicados en la citada referencia [12].

Comparando los resultados con la referencia mencionada, es importante destacar que los deslizamientos fueron, en general, superiores en los ensayos con fibras de poliolefina, duplicando prácticamente las que se produjeron con la carga máxima. La energía necesaria para despegar las fibras se podría considerar aquella que se produjo hasta la carga máxima. Ésta se incrementó con la inclinación hasta 30° , como puede verse en la Figura 11. Si se tiene en cuenta la energía total del ensayo, el trabajo de arrancamiento se incrementó con todos los ángulos y, lógicamente, con la mayor longitud embebida.

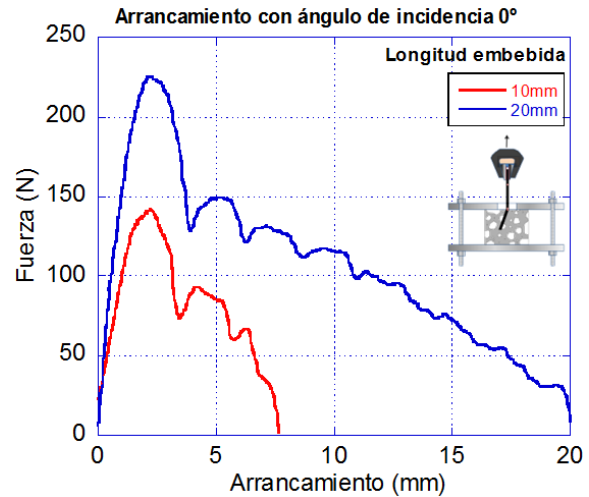


Figura 9. Comparación de las curvas de arrancamiento con inclinación 0° .

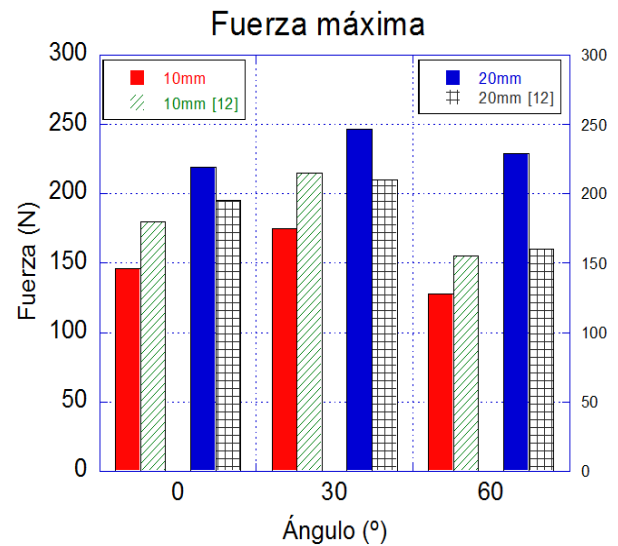


Figura 10. Fuerza máxima alcanzada en los ensayos con fibras de poliolefina y con fibras de acero según la referencia [12].

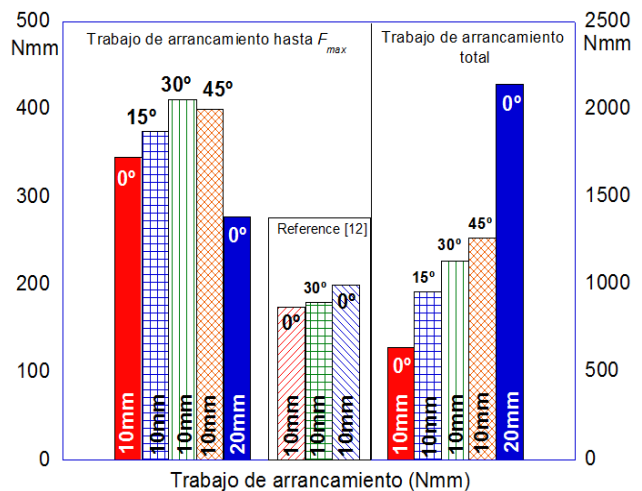


Figura 11. Trabajo de arrancamiento hasta carga pico en fibras de poliolefina y con fibras de acero de la referencia [12].

5. CONCLUSIONES

En cuanto al comportamiento en ensayos de “pull-out” de fibras de poliolefina, las principales conclusiones que se extrajeron fueron las siguientes:

- Se pudo diseñar un ensayo de “pull-out” de fibras poliméricas con video-extensometría que permitió obtener deformaciones y desplazamientos y asegura la inexistencia de desplazamientos relativos en la mordaza.
- Gracias al sistema de vídeo-extensometría se pudo localizar el instante en el que la fibra comenzó a deslizarse y obtener la subsecuente tensión inicial de deslizamiento de la fibra.
- La orientación con la que la fibra se encuentra dentro de la matriz varía su comportamiento, resultando la carga máxima de arrancamiento máxima en 45° y el trabajo necesario para producir el despegue fue máximo para 30° de inclinación.
- Las probetas con un ángulo mayor de 45° sufren una rotura parcial de la matriz de hormigón.
- La fuerza máxima de despegue de la fibra sobre su matriz, está ligada a la longitud embebida de la fibra.
- La longitud crítica de las fibras se encuentra próxima a los 20mm.
- Las fuerzas máximas y los valores de energía de arrancamiento obtenidos fueron semejantes a los que se pueden encontrar en la bibliografía sobre fibras de acero con extremos conformados [12].

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la colaboración de Sika a través de la Cátedra Universidad-Empresa Sika-UPM. En particular, Marcos García Alberti agradece la beca doctoral otorgada. Además, agradecen al Ministerio de Economía y competitividad la concesión del proyecto DPI2011-24876.

REFERENCIAS

- [1] J. A. López, P. Serna, E. Camacho, H. Coll y J. Navarro-Gregori, “First Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete Footbridge in Spain: Design and Construction”, *Structural Engineering International*, vol. 24(1), pp. 101-104, 2014.
- [2] P. Serna, S. Arango, T. Ribeiro, a. M. Núñez y E. Garcia-Taengua, “Structural cast-in-place SFRC: technology, control criteria and recent applications in Spain”, *Materials and Structures*, 42(9), p. 1233-1246, 2009.
- [3] F. Laranjeira, C. Molins y A. Aguado, “Predicting the pullout response of inclined hooked steel fibers”, *Cement and Concrete Research*, vol. 40(10), pp. 1471-1487, 2010.
- [4] L. Yan, R. L. Pendleton y C. H. M. Jenkins, “Interface morphologies in polyolefin fiber reinforced concrete composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing”, *Cement and Concrete Research*, Vols. 29(5-6), pp. 643-650, 1998.
- [5] A. Tagnit-Hamou, Y. Vanhove y N. Petrov, “Microstructural analysis of the bond mechanism between polyolefin fibers and cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, vol. 35(2), pp. 364-370, 2005.
- [6] P. Pujadas, A. Blanco, S. Cavalaro y A. Aguado, “Plastic fibres as the only reinforcement for flat suspended slabs: Experimental investigation and numerical simulation”, *Construction and Building Materials*, vol. 57, pp. 92-104, 2014.
- [7] Ministerio de Fomento, Instrucción de hormigón estructural (EHE-08), 2008.
- [8] M. G. Alberti, A. Enfedaque y J. Gálvez, “On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 55, pp. 274-288, 2014.
- [9] M. G. Alberti, A. Enfedaque y J. C. Gálvez, “Estudio del comportamiento mecánico y en fractura de un hormigón autocompactante con fibras de poliolefina”, de *Anales de Mecánica de Fractura*, 30, Vol. 1, pp. 73-78.
- [10] M. G. Alberti, V. Agrawal, A. Enfedaque y J. C. Gálvez, “Hormigón reforzado con alto contenido de fibras de poliolefina”, de *Anales de Mecánica de la Fractura* 31, Vol. 1, pp. 213-218, 2014.
- [11] V. M. Cunha, J. A. Barros y J. M. Sena-Cruz, “Pullout behavior of steel fibers in self-compacting concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 22(1), pp. 1-9, 2010.
- [12] P. Robins, S. Austin y P. Jones, “Pull-out behaviour of hooked steel fibres”, *Materials and Structures*, vol. 35(August), p. 434-442, 2002.
- [13] V. C. Li y H. Stang, “Interface property characterization and strengthening mechanisms in fiber reinforced cement based composites”, *Advanced cement based materials*, pp. 6(1), 1-20., 1997.
- [14] A. E. Naaman, “Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1(3), pp. 241-252, 2003.
- [15] B. Oh, K. J.C. y C. Y.C., “Fracture behavior of concrete members reinforced with structural synthetic fibers”, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, pp. 243-257, 2007.
- [16] M. G. Alberti, A. Enfedaque, J. C. Gálvez, M. F. Cánovas y I. R. Osorio, “Polyolefin fiber-reinforced concrete enhanced with steel-hooked fibers in low proportions”, *Materials & Design*, vol. 60, pp. 57-65, 2014.